

0 - 795212

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



Александрова Анна Геннадьевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ
ЭВОЛЮЦИИ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА
ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ЗОНЫ

Специальность 01.03.01 – астрометрия и небесная механика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в ОСП НИИ прикладной математики и механики
Томского государственного университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Бордовицына Татьяна Валентиновна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, доцент
Кузнецов Эдуард Дмитриевич,
зав. кафедрой астрономии и геодезии
Уральского федерального университета

кандидат физико-математических наук, доцент
Поляхова Елена Николаевна,
доцент кафедры небесной механики
Санкт-Петербургского государственного университета

Ведущая организация: Институт астрономии РАН

Защита диссертации состоится 19 июня 2012 г. в 15 ч. 30 м. на заседании
совета Д 212.232.15 по защите докторских и кандидатских диссертаций
при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу:
198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28,
ауд. 2143 (Математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ



0000808113

Ученый секретарь
диссертационного совета

25 апреля 2012 г.

7

Орлов В.В.

Актуальность проблемы

Как известно (Рыхлова, 2003; Klinkrad, 2006), источниками космического мусора являются отслужившие свой срок космические аппараты (КА), отработавшие верхние ступени ракет-носителей, а также фрагменты космических аппаратов, образовавшиеся в результате преднамеренных или самопроизвольных взрывов на орбитах или при столкновении космических аппаратов. По данным службы контроля космического пространства NASA (<http://www.nasa.gov>) в околоземном космическом пространстве на сегодня находится около 22000 объектов искусственного происхождения размером от 10 см и более, каталогизировано 15855 объектов, только 6% из них – действующие КА, а все остальное – космический мусор: 24% приходится на нефункционирующие КА, 17% – верхние ступени ракет носителей, 40% – фрагменты и 13% – космический мусор, связанный с миссиями КА. В целом предполагается, что в космосе на сегодня находится несколько сотен тысяч (600000-700000) объектов размером менее 10 см и ежегодный прирост составляет 600-700 фрагментов.

Вся эта совокупность неуправляемых объектов стала частью околоземной космической среды, эволюция которой происходит по законам небесной механики. Однако механизм образования объектов оказывает значительное влияние на общую картину их орбитальной эволюции, поэтому численное моделирование процесса образования космического мусора заслуживает особого внимания. Для объектов, образовавшихся в результате распада аппарата, нужно сначала построить модель распада и с помощью этой модели задать начальное пространственное распределение фрагментов по скоростям и только после этого можно приступать к исследованию их орбитальной эволюции. Численное моделирование позволяет выявить особенности распределения объектов в пространстве и проследить его изменения во времени, обнаружить области с максимальной плотностью потока фрагментов, а, следовательно, и наиболее опасные.

Особый интерес с точки зрения исследования динамической эволюции космического мусора представляет геостационарная зона (или зона ГСО), под которой здесь и далее будем подразумевать область пространства во-

круг экваториальной орбиты со средним радиусом $A = 42164$ км, шириной 150 км вдоль радиуса орбиты и протяженностью $\pm 15^\circ$ по широте (Flury et al, 2000). Данная область околоземного пространства является технически сильно загруженной, и в ней нет эффективных механизмов самоочистки, кроме того именно в этой области околоземного пространства тенденция к возникновению хаоса в движении объектов проявляется особенно заметно. По данным 14-го издания каталога European Space Agency (ESA) «Classification of Geosynchronous Objects» в настоящее время в геостационарной зоне находятся 1307 известных объектов, 1234 из них каталогизированы. Из всего выше сказанного следует, что решаемая в настоящей работе проблема исследования динамической эволюции объектов космического мусора весьма актуальна.

Цели работы

Целью настоящей работы является исследование особенностей долговременной орбитальной эволюции объектов космического мусора в геостационарной зоне.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведен анализ литературных источников и построено программно-математическое обеспечение для моделирования распада КА на орбите в результате взрыва и столкновения. Проведено тестирование модели по данным наблюдений, представленным в каталоге NASA «History of on-Orbit Satellite Fragmentations».
2. Исследованы особенности орбитальной эволюции комплекса фрагментов космического мусора в геостационарной области в зависимости от механизма образования и положения КА на орбите.
3. Разработан алгоритм для MEGNO-анализа орбитальной эволюции ИСЗ. Проведен MEGNO-анализ особенностей динамики объектов геостационарной области. Исследовано влияние гармоник геопотенциала на характер MEGNO-эволюции объектов зоны ГСО.
4. Проведен MEGNO-анализ влияния светового давления на движение объектов зоны ГСО.

5. Разработан алгоритм для прогнозирования столкновений объектов космического мусора с действующими аппаратами и между собой, основанный на построении доверительных областей движения.

Научная новизна работы

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработано программно-математическое обеспечение для моделирования распада КА в результате взрыва и столкновения. С его помощью исследована зависимость распределения фрагментов распада от механизма образования и положения КА на орбите.
2. Разработан алгоритм для MEGNO-анализа орбитальной эволюции ИСЗ. Проведен MEGNO-анализ динамической структуры области ГСО с учетом влияния гармоник геопотенциала произвольного порядка и степени, притяжения от Луны и Солнца, светового давления и эффекта Пойнтинга-Робертсона. Выявлены особенности влияния различных гармоник геопотенциала на MEGNO-эволюцию объектов.
3. Проведено исследование влияния светового давления и эффекта Пойнтинга-Робертсона на устойчивость движения объектов зоны ГСО.
4. Разработан алгоритм вероятностной оценки возможных столкновений объектов космического мусора, основанный на построении доверительных областей движения.

Практическая значимость работы

Представленные в работе модели, а также построенное на их основе программное обеспечение могут быть использованы для исследования динамической эволюции объектов космического мусора и выявления областей хаотичности движения околоземных объектов. Изложенный алгоритм вероятностной оценки возможных столкновений может быть использован для выявления опасных траекторий и оценки вероятности столкновений КА.

Результаты, выносимые на защиту

1. Программно-математическое обеспечение для моделирования распада КА в результате взрыва и катастрофического столкновения. Результаты тестирования модели распада по данным наблюдений NASA, показывающие высокую степень совпадения данных моделирования с наблюдениями.
2. Результаты исследования зависимости распределения и орбитальной эволюции объектов космического мусора от механизма образования в геостационарной зоне.
3. Алгоритм для MEGNO-анализа орбитальной эволюции ИСЗ. Результаты MEGNO-анализа особенностей динамической эволюции объектов геостационарной области, демонстрирующие наличие областей неустойчивости и их разрастание со временем.
4. Алгоритм вероятностной оценки возможности столкновений объектов космического мусора, основанный на исследовании доверительных областей движения объектов.
5. Результаты исследования долговременной орбитальной эволюции объектов геостационарной области (выявление зон неустойчивости и анализ возможных столкновений по каталогу ESA «Classification of Geosynchronous Objects»).

Апробация работы

По результатам исследований опубликовано 21 работа, 9 из них в ведущих рецензируемых изданиях, зарегистрировано одно программное обеспечение (свидетельство о государственной регистрации программы № 2010616152, Бордовицына и др., 2010 г.). Результаты исследований докладывались на 10 научных конференциях:

1. V Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», г. Томск, 3–5 октября 2006 г.
2. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2007, г. Казань, 18-21 сентября 2007 г.

3. XXXVII Международная студенческая научная конференция, г. Екатеринбург, 28 января – 1 февраля, 2008 г.
4. VI Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», г. Томск, 30 сентября – 2 октября 2008 г.
5. Всероссийская конференция «Современная баллистика и смежные вопросы механики», г. Томск, 2009 г.
6. Всероссийская конференция с участием зарубежных ученых «Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф». г. Томск, 18–20 октября 2010 г.
7. XIII Международная школа молодых ученых «Физика окружающей среды» 22 – 27 июня 2010 г.
8. VII Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», г. Томск, 12 – 14 апреля 2011 г.
9. Околоземная астрономия 2011. г. Красноярск, 5-10 сентября 2011
10. II Всероссийская Молодёжная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», г. Томск, 11–13 Апреля 2012 г

Результаты, представленные в диссертации, включены в отчеты по проекту № 2.1.2/2629 «Развитие и применение основанных на параллельных вычислениях математических моделей сложных космических систем естественного и искусственного происхождения», выполняемого в рамках АВЦП «Развитие потенциала высшей школы»; в отчеты по гос. контрактам № П1247 и № П882 в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»; в отчет по гранту РФФИ № 11-02-00918-а.

Краткое содержание диссертационной работы

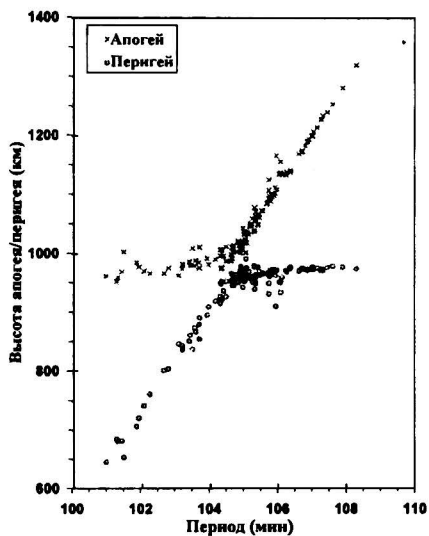
Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников (83 наименования) и семи приложений, содержит 53 рисунка и 5 таблиц. Общий объем работы составляет 117 страниц.

Во введении дано обоснование актуальности проблемы, сформулированы цель, новизна и практическая значимость исследований, приведены результаты, выносимые на защиту, список публикаций и апробация работы, описана структура диссертации.

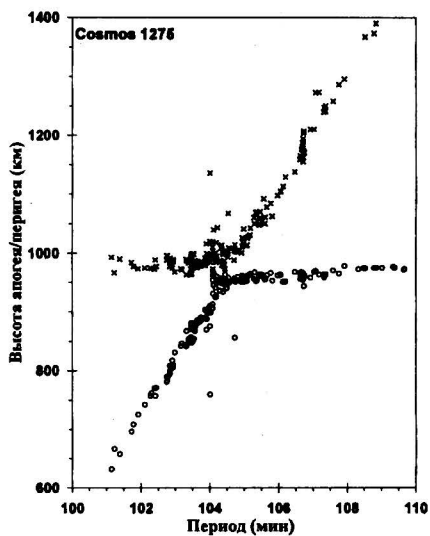
В первой главе представлено описание разработанного автором программно-математического обеспечения, предназначенного для исследования процесса образования и пространственного распределения фрагментов космического мусора, возникающего на орбитах в результате распада КА при двух механизмах фрагментации: взрыв и столкновение. Дано описание программного комплекса «Численная модель движения систем ИСЗ» (свидетельство о государственной регистрации программы № 2010616152, Бордовицына Т.В. и др., 2010 г.), разработанного при участии автора диссертации. Приведены результаты тестирования моделей по данным измерений, а также результаты исследования зависимости распределения и орбитальной эволюции фрагментов распада КА в геостационарной зоне от механизма образования и положения КА на орбите.

Программный комплекс «Численная модель движения систем ИСЗ» основан на интегрировании дифференциальных уравнений движения спутников в прямоугольных координатах с учетом следующих возмущающих факторов: гармоник геопотенциала до 360-го порядка и степени, приливных деформаций в теле Земли, притяжения от Луны и Солнца, световое давление, эффекта Пойнтинга-Робертсона и сопротивления атмосферы, для которых в данном разделе диссертации приведено описание математических моделей. Далее в первой главе дано описание интегратора Гаусса-Эверхарта, используемого для численного интегрирования дифференциальных уравнений движения ИСЗ. Рассмотрены особенности реализации программного комплекса на кластере «Скиф Cyberia» ТГУ.

Модели распада КА тестировались по данным наблюдений, представленным в каталоге NASA «Hystory of on-Orbit Satellite Fragmentations.» (рисунок 1–2). Тестирование показало хорошее совпадение результатов моделирования с данными каталога, а, следовательно, возможность использовать программу для задания начального пространственного распределения фрагментов распада КА для исследования особенностей динамической эволюции фрагментов.

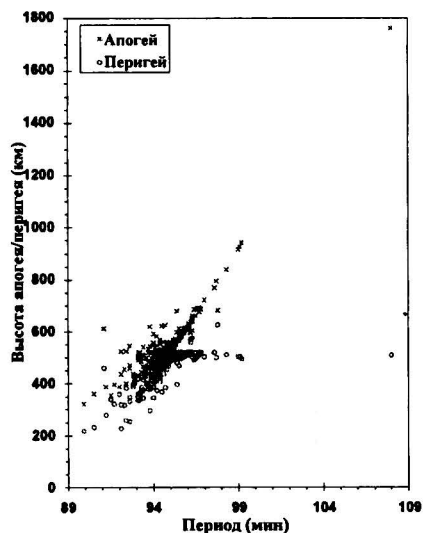


а) по данным каталога NASA

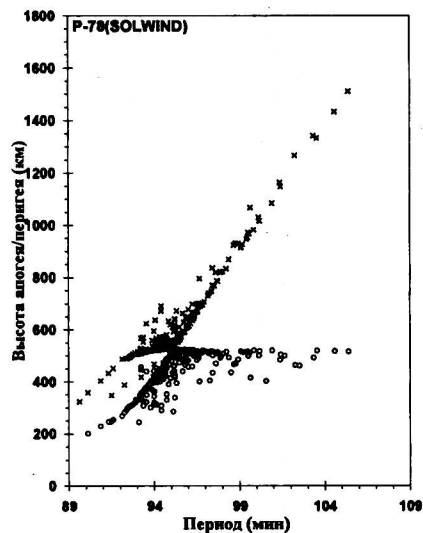


б) по данным моделирования

Рисунок 1 — Распределение фрагментов распада КА Космос 1275
через неделю после взрыва



а) по данным каталога NASA



б) по данным моделирования

Рисунок 2 — Распределение фрагментов распада P-78 (SOLWIND)
через 11 часов после столкновения

Были рассмотрены два механизма образования фрагментов распада КА: взрыв и катастрофическое столкновение.

В случае распада в результате столкновения приведены результаты исследования зависимости динамической эволюции фрагментов распада от относительной скорости и массы ударника, а также от положения КА во время распада. Были выбраны различные типы орбит в зоне ГСО: орбиты с малой и большой амплитудами либрации относительно устойчивых точек 75° и 255° , круговые орбиты, либрирующие относительно двух точек и неустойчивые орбиты.

Для каждого случая распада приведены графики зависимости изменения большой полуоси a от долготы подспутниковой точки λ фрагментов на интервале времени 10 лет, что позволяет без труда определить характерные типы орбит образовавшихся фрагментов. Даны также графики, отображающие распределение пространственной плотности фрагментов по широте и долготе подспутниковой точки через 10 лет после распада. С их помощью можно отследить образование максимумов концентрации фрагментов распада (рисунок 3, а — распределение фрагментов распада по долготе подспутниковой точки и большой полуоси; б — плотность распределения фрагментов распада КА).

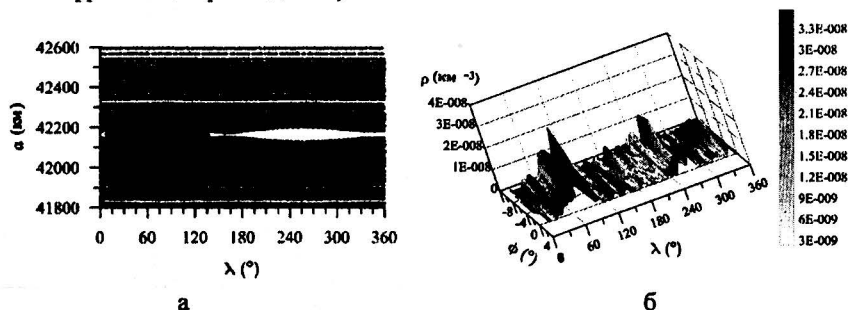


Рисунок 3 — Распределение фрагментов распада КА в результате столкновения на орбите с малой амплитудой либрации относительно точки 75° на интервале времени 10 лет

Далее в первой главе приведены результаты исследования влияния мощности взрыва на эволюцию облака фрагментов распада КА в результате взрыва. При этом рассматривались те же типы орбит, что и в случае распада в результате столкновения.

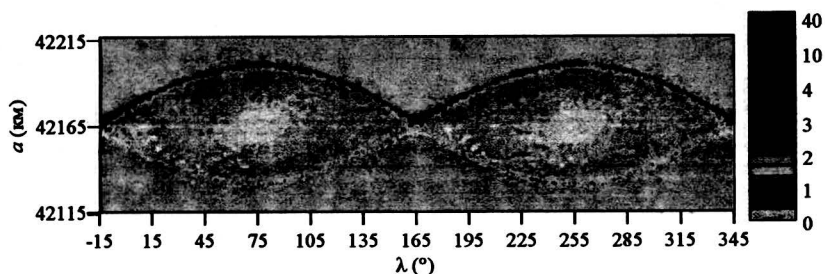
Во всех рассмотренных случаях распада КА наблюдается уменьшение пространственной плотности распределения фрагментов: при взрыве – с увеличением интенсивности взрыва, при столкновении КА – с увеличением скорости и массы ударника. Наиболее часто кластеризация фрагментов происходит в окрестности устойчивых точек либрации, и, следовательно, данные области являются зонами повышенной плотности фрагментов.

Вторая глава диссертации посвящена результатам исследования хаотической динамики ИСЗ в геостационарной области. В качестве основной характеристики хаотичности движения использовался, так называемый, усредненный параметр MEGNO (Mean Exponential Growth of Nearby Orbit), который представляет собой взвешенную по времени интегральную форму лиapunовского характеристического числа (LCN).

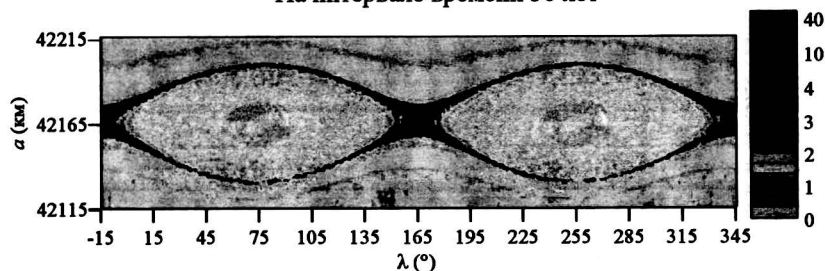
Дано описание программно-алгоритмического обеспечения, разработанного для MEGNO-анализа орбитальной эволюции ИСЗ. Показаны результаты тестирования программы. Приведены результаты MEGNO-анализа динамической структуры области ГСО с учетом влияния гармоник геопотенциала, притяжения от Луны и Солнца, светового давления и эффекта Пойнтинга-Робертсона на интервале времени 200 лет. Выявлены особенности влияния различных гармоник геопотенциала на MEGNO-эволюцию объектов.

Для сравнения полученных результатов с результатами других авторов (Valk et al, 2009; Breiter et al, 2005) рассмотрена эволюция MEGNO структуры орбитального пространства зоны ГСО под влиянием основного резонанса, связанного с влиянием гармоники геопотенциала второго порядка и степени. С этой целью было выполнено моделирование орбитальной эволюции ряда объектов со следующими параметрами: большой полуосью $a = 42165 \pm 50$ км (с шагом 1 км), эксцентриситетом $e = 0$ и наклоном $i = 0^\circ$, долгота подспутниковой точки варьировалась от 0 до 360° с шагом 1° . При учете влияния светового давления отношение площади миделевого сечения к массе полагалось равным $0.001 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Полученные в процессе эксперимента значения параметра MEGNO через 30 и 200 лет после начала прогноза приведены на рисунке 4. Хорошо виден рост значения параметра MEGNO по мере приближения к сепаратрисам, разделяющим области либрационного и кругового движения.



На интервале времени 30 лет

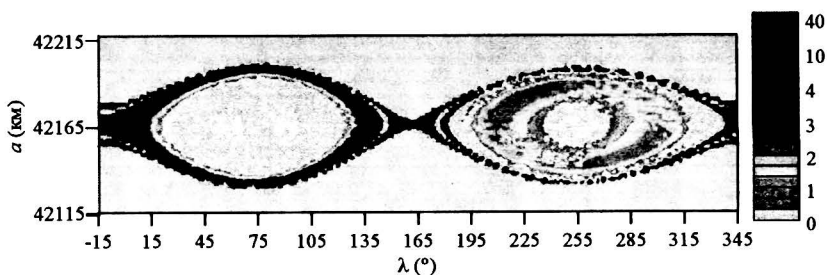


На интервале времени 200 лет

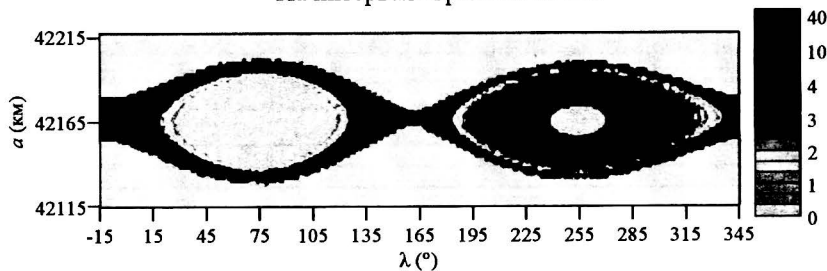
Рисунок 4 — Усредненный параметр MEGNO

Показано, что полученные результаты хорошо согласуются с результатами других авторов (Valk et al, 2009; Breiter et al, 2005) с той лишь разницей, что в отличие от результатов, приведенных в (Valk et al, 2009), в нашем эксперименте устойчивые области внутри сепаратрис хорошо сохраняются и на 200 летнем интервале времени. Однако с увеличением числа учитываемых гармоник геопотенциала картина существенно меняется, поскольку проявляется действие резонансов более высоких порядков, которые, как отмечается в (Cincotta et al, 2003), фактор MEGNO хорошо улавливает.

На графиках (рисунок 5) показана зависимость параметра MEGNO от начального положения объекта через 30 и 200 лет после начала прогноза при учете гармоник 4-го порядка и степени. Хорошо видно, что минимальные значения параметра приходятся на области в окрестности устойчивых точек либрации 75° и 255° , максимальные на области неустойчивых 165° и 345° . Кроме того, при учете гармоник 4-го порядка и степени мы видим появление областей с неустойчивым типом движения между устойчивой точкой либрации 255° и сепаратрисами. В окрестности точки 75° такие области не обнаруживаются.



На интервале времени 30 лет



На интервале времени 200 лет

Рисунок 5 — Усредненный параметр MEGNO

После получения столь разных картин устойчивости движения при учете гармоник 2-го и 4-го порядка, было проведено исследование влияние числа учитываемых гармоник геопотенциала на поведение параметра MEGNO, которое показало, что влияние гармоник выше 2-го порядка и степени приводит к появлению области с неустойчивым типом движения между устойчивой точкой либрации 255° и неустойчивыми 165° и 345° , что объясняется влиянием резонансов более высоких порядков. Данные результаты показывают необходимость учета гармоник геопотенциала как минимум третьего порядка и степени при исследовании хаотической динамики геостационарной области. Интересно отметить, что в окрестности точки 75° влияние резонансов высоких порядков очень мало, что, как показано в работе, связано разной степенью влияния геопотенциала на объекты, находящиеся в окрестностях устойчивых точек либрации.

Далее во второй главе диссертации изложены результаты исследования влияния светового давления на динамику объектов зоны ГСО. Сила светового давления, как отмечается в работах (Туева, Авдюшев, 2006; Кузнецов, 2011) является важным фактором орбитальной эволюции объектов, движущихся в околоземном пространстве. Приводимые в данной главе ре-

зультаты полностью подтверждают этот факт, но в отличие от работ других авторов здесь сила светового давления рассматривается как источник появления хаоса в движении околоземных объектов. Внимание сосредоточено на объектах геостационарной зоны, поскольку с одной стороны, эта область околоземного пространства является одной из наиболее замусоренных областей, а с другой стороны, именно в зоне ГСО тенденция к возникновению хаоса в движении объектов проявляется особенно заметно.

Представлены результаты исследования влияния увеличения парусности γ (отношения площади к массе) на динамическую эволюцию КА в геостационарной зоне. Рассмотрена эволюция орбитальных элементов и изменение параметра MEGNO для объекта, обладающего устойчивым типом движения наподобие гармонического осциллятора ($a = 42165$ км, $e = 0$, $i = 0^\circ$, $\lambda = 75^\circ$) (рисунок 6). Данная орбита является одной из наиболее устойчивых, при малых значениях парусности параметр MEGNO остается близким к нулю на интервале времени 200 лет. Орбита перестает быть устойчивой при значении парусности $\gamma = 3 \text{ м}^2/\text{кг}$ через 30 лет после начала прогноза. Как видно на рисунке 2.14 через 30 лет при значении парусности $\gamma = 8 \text{ м}^2/\text{кг}$, наступает уход объекта из резонансной области и параметр MEGNO резко возрастает, что указывает на переход объекта на хаотическую орбиту.

Объекты уходят из геостационарной области при значениях парусности $\gamma \geq 8 \text{ м}^2/\text{кг}$ и, как показал MEGNO-анализ, это всегда происходит по хаотической орбите.

Далее во второй главе приведены результаты исследования зависимости параметра MEGNO от начального положения объекта через 30 и 100 лет после начала прогноза при $\gamma = 0.001 \text{ м}^2/\text{кг}$ и $\gamma = 1 \text{ м}^2/\text{кг}$ и через 30 и 50 лет для $\gamma = 10 \text{ м}^2/\text{кг}$. Результаты показали, что световое давление при большой парусности объектов является фактором, расширяющим область хаотичности в зоне ГСО. Кроме того, показано, что даже объекты с устойчивым типом движения наподобие гармонического осциллятора с увеличением парусности переходят на неустойчивые орбиты. Необходимо отметить, что это происходит при меньших значениях парусности, чем значения, при которых наступает уход из области либрационного резонанса.

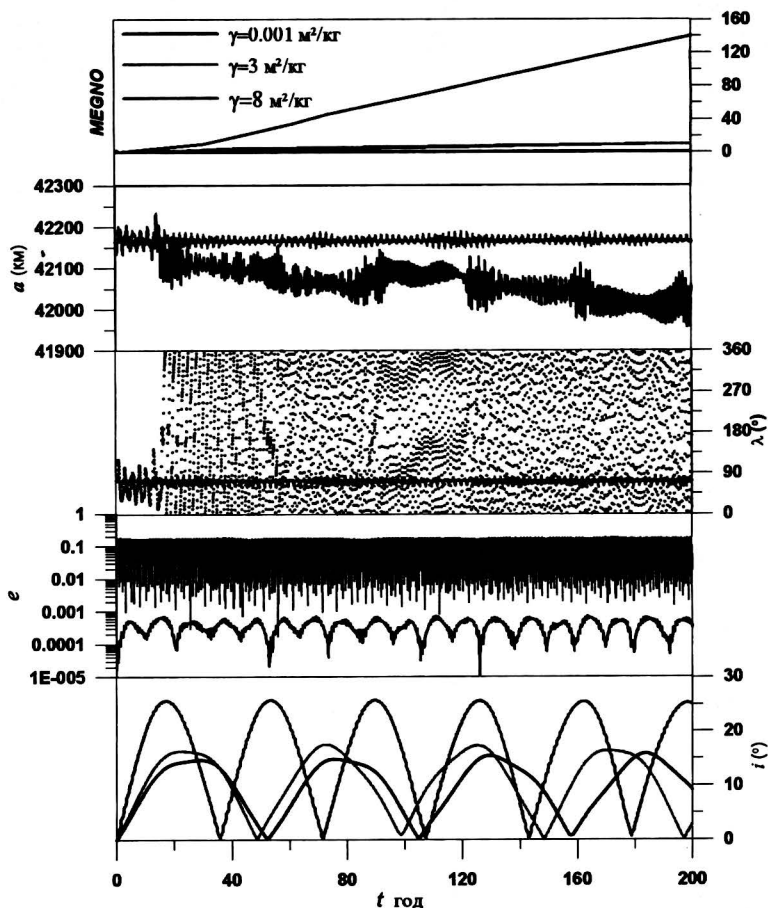


Рисунок 6 — Эволюция параметров орбиты объекта, либрирующего с малой амплитудой относительно устойчивой точки либрации 75°

В третьей главе приведены результаты исследования долговременной орбитальной эволюции совокупности неуправляемых объектов зоны ГСО.

Изложен алгоритм выявления возможных столкновений объектов космического мусора. Дано описание алгоритма построения начальной и текущей доверительных областей движения объекта с использованием ковариационной матрицы полученной в процессе дифференциального уточнения орбит по данным измерений. Приведены оценки зависимости размеров доверительной области от точности наблюдений.

Представлены результаты MEGNO-анализа динамической эволюции на интервалах времени 30, 100 и 200 лет всей совокупности объектов геостационарной зоны, приведенных в каталоге ESA «Classification of Geosynchronous Objects». Показано, что со временем все большее количество КА оказывается на неустойчивых орбитах. И если на интервале времени 30 лет неустойчивых объектов относительно немного, то через 100 и 200 лет их число возрастает в несколько раз.

Далее в третьей главе представлены результаты исследования динамической эволюции 624 неуправляемых на 1 января 2009 г объектов ESA на предмет возможных сближений объектов. Выявлены все сближения объектов на расстояние менее 100 км на интервале времени 10 лет. Таких сближений оказалось 514556, среди них 30125 сближений на расстояние менее 20 км, 12274 на расстояние менее 10 км и 19 сближений на расстояние менее 1 км. Для последних 19 сближений по оценкам, полученным с помощью метода наименьших квадратов (НК), были построены доверительные области для сближающихся объектов и прослежена их динамическая эволюция до момента наиболее тесного сближения. Показаны объекты, для которых на момент сближения имеет место пересечение доверительных областей, что говорит о возможности столкновения.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в процессе выполнения диссертационной работы.

1. На основе анализа литературных источников построено программно-математическое обеспечение для моделирования распада КА в результате взрыва и столкновения.
2. Проведено тестирование модели по данным наблюдений, представленным в каталоге NASA «History of on-Orbit Satellite Fragmentations». Тестирование показало хорошее согласование результатов моделирования с данными наблюдений, а, следовательно, возможность использовать программу для задания начального пространственного распределения фрагментов распада КА в результате взрыва и катастрофического столкновения для исследования особенностей динамической эволюции с помощью программного комплекса «Численная модель движения систем ИСЗ».

3. Получены результаты исследования особенности орбитальной эволюции комплекса фрагментов космического мусора в геостационарной области в зависимости от механизма образования и положения КА на орбите в момент распада. Выявлены зоны повышенного риска. Показано, что наиболее часто кластеризация фрагментов происходит в окрестностях устойчивых точек либрации, реже вблизи неустойчивых. Пространственная плотность фрагментов распада КА уменьшается с увеличением мощности взрыва, а в случае столкновения – при увеличении массы и скорости ударника.
4. Разработан алгоритм для MEGNO-анализа орбитальной эволюции ИСЗ. Дано описание MEGNO-анализа особенностей динамики объектов геостационарной области. Показано, что со временем происходит расширение зоны стохастичности, как правило, за счет объектов с двумя типами движения: либрацией относительно двух устойчивых точек и квазипериодическим движением. Выявлена зона неустойчивости в области между устойчивой точкой либрации 255° и сепаратрисами, вызванная влиянием гармоник геопотенциала выше второго порядка и степени.
5. Получены результаты исследования влияния гармоник геопотенциала на параметры хаотичности движения объектов зоны ГСО. Показано, что нельзя ограничиваться учетом гармоник второго порядка и степени, поскольку влияние резонансных гармоник высоких порядков может приводить к возрастанию параметра MEGNO. При проведении MEGNO-анализа необходимо учитывать гармоники геопотенциала, как минимум третьего порядка и степени.
6. Выполнен MEGNO-анализ влияния светового давления на движение объектов зоны ГСО. Световое давление рассматривалось как источник появления хаоса в движении околоземных объектов. Проведенный анализ показал, что световое давление с увеличением значения парусности объектов γ является фактором, расширяющим область хаотичности в зоне ГСО. Кроме того, показано, что даже объекты с устойчивым типом движения наподобие гармонического осциллятора с увеличением парусности переходят на неустойчивые

орбиты, и при значении $\gamma = 10 \text{ м}^2/\text{кг}$ на интервале времени больше тридцати лет устойчивых объектов не остается. Выявлено, что уход ИСЗ из геостационарной области при увеличении парусности объектов всегда происходит по хаотической орбите.

7. Разработан алгоритм для прогнозирования столкновений объектов космического мусора с действующими аппаратами и между собой с использованием доверительных областей движения.
8. Исследована долговременная орбитальная эволюция всей совокупности объектов 11-го издания каталога ESA «Classification of Geosynchronous Objects». Проведен MEGNO-анализ объектов каталога на интервале времени 200 лет. Показано разрастание области неустойчивости со временем. Приведены результаты прогнозирования возможных столкновений КА.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- Александрова А.Г. Особенности эволюции околоземных космических объектов, образовавшихся в результате столкновения КА // Матер. VI Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики». Томск: Изд-во ТГУ. 2008. С. 407–408
- Александрова А.Г., Бордовицына Т.В. Зависимость распределения и орбитальной эволюции объектов геостационарной зоны от механизма образования // Матер. VI Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики». Томск: Изд-во ТГУ. 2008. С. 409–410
- Александрова А.Г. Об исследовании долговременной эволюции областей возможных движений объектов геостационарной зоны // Матер. Всероссийской конференции «Современная баллистика и смежные вопросы механики». Томск: Изд-во ТГУ. 2009. С. 287–288
- Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Чувашов И.Н. Об исследовании долговременной эволюции доверительных областей движения объектов геостационарной зоны // Изв. вузов. Физика. 2009. № 10/2. С. 20–25.

- Александрова А.Г. Методика прогнозирования столкновений объектов космического мусора на околоземных орбитах // Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф. Матер. Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых. Томск: Изд-во ТГУ. 2010а. С. 6–7.
- Александрова А.Г. Численное исследование влияния параметров столкновения объектов в геостационарной зоне на эволюцию образовавшихся фрагментов // Изв. Вузов. Физика. 2010b. № 8/2. С. 5–13
- Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Чувашов И.Н. MEGNO-анализ орбитальной эволюции объектов зоны ГЕО // Матер. международной конференции «Околоземная астрономия 2011». Красноярск. Изд-во СибГАУ. 2011а. С. 22
- Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Чувашов И.Н. MEGNO-анализ влияния светового давления на орбитальную эволюцию объектов зоны ГЕО // Изв. Вузов. Физика. 2011b. № 6/2. С. 39–46.
- Александрова А.Г., Чувашов И.Н., Бордовицына Т.В. MEGNO-анализ орбитальной эволюции объектов зоны ГЕО // Изв. Вузов. Физика. 2011c. № 6/2. С. 47–54.
- Бордовицына Т.В., Батурин А.П., Васильева П.В., Головкина А.Г. Структура и эволюция комплекса фрагментов космического мусора, образовавшегося в результате распада космических аппаратов на орбитах // Матер. V Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики». Томск: Изд-во ТГУ. 2006. С. 420–421.
- Бордовицына Т.В., Головкина А.Г. Механизмы образования космического мусора и особенности его динамической эволюции // Тр. Всероссийской астрономической конференции ВАК-2007. Изд-во КГУ. 2007. С. 106–107.
- Бордовицына Т.В., Головкина А.Г., Летнер Э.А. Численное моделирование динамики всей совокупности объектов геостационарной зоны // Тр. Всероссийской астрономической конференции ВАК-2007. Изд-во КГУ. 2007b. С. 107–109.

- Бордовицына Т.В., Александрова А.Г. Исследование долговременной эволюции всех объектов геостационарной зоны // Матер. VI Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики». Томск: Изд-во ТГУ. 2008. С. 413–414
- Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А., Чувашов И.Н., Александрова А.Г., Томилова И.В. Численное моделирование движения систем ИСЗ в среде параллельных вычислений // Изв. ВУЗов. Физика. 2009. Т. 52. №. 10/2. С. 5–11.
- Бордовицына Т.В., Александрова А.Г. Численное моделирование процесса образования орбитальной эволюции и распределения фрагментов космического мусора в околоземном пространстве // Астрон. вестн. 2010. Т. 44. С. 259–272
- Бордовицына Т.В., Александрова А.Г., Чувашов И.Н. Комплекс алгоритмов и программ для исследования хаотичности в динамике искусственных спутников Земли / Изв. вузов. Физика. 2010а. № 8/2. С.14–21
- Бордовицына Т.В., Александрова А.Г., Чувашов И.Н. Устойчивость и хаос в динамике неуправляемых объектов геостационарной зоны // Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф. Матер. Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых. Томск: Изд-во ТГУ. 2010б. С. 29–30.
- Бордовицына Т.В., Александрова А.Г., Чувашов И.Н. Численное моделирование динамики околоземных космических объектов искусственного происхождения с использованием параллельных вычислений// Вестник Том. гос. ун-та. Математика и механика 2011. № 4(16). С. 34–48
- Головкина А.Г. Исследование по данным наблюдений численных моделей образования космического мусора в результате распада КА на орбитах // Матер. V Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики». Томск: Изд-во ТГУ. 2006. С. 434–435.
- Головкина А.Г. Особенности динамической эволюции космического мусора, образовавшегося в геостационарной зоне в результате взрыва космического аппарата // Изв. вузов. Физика. 2007. №12/2. С. 26–32

Головкина А.Г. Особенности динамической эволюции космического мусора, образовавшегося в геостационарной зоне в результате взрыва космического аппарата // Физика космоса: Тр. 37 международ. студ. науч. конф., 28 января – 1 февраля 2008. Екатеринбург: Изд-во УрГУ. 2008. С. 256.

Зарегистрированное программное обеспечение

Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А., Александрова А.Г., Чувашов И.Н. «Численная моделирование в среде параллельных вычислений движения больших систем искусственных спутников Земли». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010616152. 2010.

Самостоятельно автором работы разработано программно-математическое обеспечение для моделирования распада КА в результате взрыва и столкновения, проведено тестирование модели по данным наблюдений NASA, исследовано влияние параметров распада в геостационарной зоне на эволюцию образовавшихся фрагментов (Головкина, 2006; Бордовицына и др., 2006; Головкина, 2007; Бордовицына, Головкина, 2007; Александрова, 2008; Александрова, Бордовицына, 2008; Бордовицына, Александрова, 2010; Александрова, 2010b).

В совместных работах Бордовицыной Т.В. принадлежит постановка задачи и обсуждение полученных результатов. Совместно с Чувашовым И.Н. разработана методика и программное обеспечение для прогнозирования столкновений объектов космического мусора на околоземных орбитах с использованием доверительных областей движения (Александрова, 2009; Александрова и др., 2009; Александрова, 2010a; Бордовицына и др., 2011), построен комплекс алгоритмов и программ для исследования хаотичности в динамике искусственных спутников Земли, выполнено тестирование программ и получен ряд расчетных материалов (Бордовицына и др., 2010a; Александрова и др., 2011a; Александрова и др., 2011b; Александрова и др., 2011c).

Список цитируемой литературы

- Кузнецов Э.Д. О влиянии светового давления на орбитальную эволюцию геосинхронных спутников // Астр. вест. 2011. Т. 45, № 5. С. 444–457.
- Рыхлова Л.В. Засоренность околоземного пространства объектами техногенного происхождения // Околоземная астрономия – 2003. Тр. конф. Т. 2. Терскол, сентябрь 2003 г. Институт астрономии РАН.СПб.: ВВМ, 2003. С. 11–19.
- Туева О.Н., Авдюшев В.А. О влиянии светового давления и эффекта Пойнтинга–Робертсона на динамику космического мусора // Околоземная астрономия – 2005: Сборник трудов конференции Казань: Каз.ГУ им. В.И.Ульянова- Ленина, 2006. С. 261–267.
- Breiter S., Wytrzyszczak, I., Melendo, B. Long-term predictability of orbits around the geosynchronous altitude // Adv. Space Res. 2005. V. 35. P 1313–1317.
- Cincotta P.M., Girdano C.M., Simo C. Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits // Physica D. 2003. V. 182. P. 151–178.
- Classification of Geosynchronous Objects. 2009. Issue 11 / by R. Choc and R. Jehn/ URL: <http://www.astronomer.ru>
- Klinkrad H. Space debris. Springer, 2006. 430 p.
- Valk S., Delsate N., Lemaître A., Carletti T., Global dynamics of high area-to-mass ratios GEO space debris by means of the MEGNO indicator // Adv. Space Res. 2009. V. 43. P. 1509–1526.

Подписано к печати 20.04.12. Формат 60 × 84 $\frac{1}{8}$.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать цифровая. Печ. л. 1,4.
Тираж 100 экз. Заказ 5444.

Отпечатано в Отделе оперативной полиграфии химического факультета СПбГУ
198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 26
Тел.: (812) 428-4043, 428-6919

